УДК 621.374

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД И ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В.В. Лопатин, И.И. Сквирская

Представлен обзор исследований и разработок НИИ высоких напряжений по электрическому разряду и его технологическим применениям, которые получили развитие в последние годы. Дано представление о подходах к моделированию разрядных процессов в диэлектрических средах. Описаны некоторые направления практического использования разных форм разряда.

Во второй половине XX века достигнуты значительные успехи в области высоковольтной импульсной техники, положившей начало новому направлению в науке - высоковольтной электрофизике и развитию ряда технологий, названных электроимпульсными или электроразрядными. Существенный вклад в развитие данного направления внесен Томской школой высоковольтников, созданной профессором А.А. Воробьевым и имеющей полувековые традиции.

Электроразрядные технологии основаны на трансформации низкотемпературной и неравновесной разрядной плазмы в газах, жидких и твердых диэлектриках или полупроводящих материалах в энергию фазовых переходов, химических реакций, механическую работу и др. Их принципиальное отличие заключается в возможности адресного сообщения веществу большой плотности энергии в импульсном режиме. Это обеспечивает высокие скорости изменения физических и термодинамических параметров в обрабатываемом веществе. Воздействие на обрабатываемое вещество в электроразрядных технологиях многофакторное: мощное электромагнитное излучение (от УФ до радиодиапазона), электрические поля, меняющиеся со скоростью до $10^{10}...10^{11}$ В/мс, заряженные частицы (электроны, ионы) и высокоэнергетичные атомы, ударные и акустические волны. Как правило, из-за неравновесности, воздействие синергетическое, т.е. энергия взаимодействия больше суммы вкладов отдельно взятых факторов.

В электроразрядных технологиях используются два типа разряда - искровой и квазиобъемный. В последнем, происходящем только в газах и смесях газ-жидкость, для избежания контракции и сохранения большого рабочего объема используются специальные приемы: сокращение длительности горения разряда (до $\sim10^{-7}$ с), увеличение скорости изменения напряженности поля до $\sim10^{11}$ В/мс, ограничение плотности разрядного тока, например, применением диэлектрических барьеров и др. Воздействие такой плазмы используется для активации химических реакций, синтеза новых соединений, включая алмазоподобные пленки и конверсию газа, разложения молекул и соединений в установках очистки воды, плазмохимических реакторах, сушки древесины и др.

Искровой разряд в конденсированных средах используется как рабочий инструмент в технологиях:

- разрушения железобетонных изделий и других крупногабаритов,
- дробления горных пород, твердых отходов и даже термопластов,
- измельчения растительного сырья,
- активации растворов для усиления экстракции,
- очистки трубопроводов и других изделий от твердых отложений, активации фильтрующих материалов,
- резания щелей, бурения скважин в скальных породах,
- получения нанопорошков металлов, их оксидов и нитридов, синтезируемых при разряде в парах электрически взрываемых проводников.

В результате десятилетий исследований разряда в институте накоплены уникальные данные: зависимости электрической прочности $E_{пр}$ материалов от межэлектродного расстояния и геометрии электродов, температуры, вида и формы воздействующего напряжения, вольтсекундные характеристики пробоя; с помощью высоковольтных электронно-оптической и лазерной тепловой съемки определены виды разрядных структур и основные закономерности их развития, а также основные параметры разрядных каналов и волн давления, вызванных их взрывным расширением. Эти данные, обобщенные в [1-8] и множестве обзорных статей, позволили приступить к компьютерному моделированию развития разряда.

Моделирование развития разряда

Формирование разрядных каналов при пробое диэлектриков происходит в результате перехода части диэлектрика в плазму под действием сильного электрического поля. Траектории разрядных каналов зависят от распределения электрического поля в диэлектрике, которое определяется геометрией электродов и наличием макронеоднородностей проводимости и/или проницаемости. В процессе развития разряда распределение поля изменяется в результате движения зарядов по разрядным каналам и в диэлектрике. Вследствие неустойчивости процессов, приводящих к образованию плазмы, и наличия микронеоднородностей в диэлектриках, разрядные каналы стохастически ветвятся и изгибаются. Из-за больших трудностей описания комплекса взаимосвязанных процессов фазового перехода формирование разрядной

структуры моделируется как фрактальный (самоподобный) рост токовых каналов, который управляется электрическим полем [9, 10]. Вероятность роста $P_n(M)$ в направлении n из точки M, принадлежащей разрядной структуре, электроду или проводящему включению, пропорциональна квадрату проекции $E_n(M)$ локальной напряженности поля на данное направление, если величина проекции больше критической величины E_c, и равна нулю в случае $E_n(M)<E_c$:

$$P_n(M)=\begin{cases}\frac{1}{Z}(E_n(M))^2, \ E_n(M)\geq E_c \\ 0, \ E_n(M)<E_c\end{cases}, \quad (1)$$

где Z - нормировочный множитель ($Z=\sum_{n,M} E_n(M)$, суммирование выполняется по всем возможным направлениям и точкам роста). Величина пороговой напряженности зарождения и развития разрядных каналов E_c зависит от вида материала и полярности напряжения. Если значение локальной напряженности поля превосходит критическое значение, то вероятность формирования нового канала, согласно соотношению (1), пропорциональна плотности энергии электрического поля в данной точке.

Динамика распределений поля E и зарядов определяется детерминистическими закономерностями. Поле в пространстве рассчитывается по теореме Гаусса [11]:

$$div(\varepsilon\varepsilon_0\vec{E})=\rho, \quad (2)$$

где ε и ε_0 - относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости, ρ - плотность свободных электрических зарядов в разрядных каналах и диэлектрике.

Изменение распределения свободных зарядов в процессе развития разрядных каналов определяется уравнением непрерывности электрического тока j:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}=-div\,\vec{j}, \quad (3)$$

а плотность тока в каналах и диэлектрике определяется законом Ома:

$$\vec{j}=\sigma\cdot\vec{E},$$

где σ - удельная электропроводность. Изменение электропроводности каналов σ_{ch} принимается пропорциональным мощности электровыделения в них:

$$\frac{\partial\sigma_{ch}}{\partial t}=\chi\cdot\sigma_{ch}\cdot E_\ell^2, \quad (4)$$

где χ - параметр возрастания проводимости, E_ℓ - проекция напряженности поля на направление канала.

Моделирование осуществляется в физическом времени, временной шаг роста на фиксируемую длину рассчитывается как:

$$\Delta t=\theta/Z, \quad (5)$$

где, θ - параметр перехода к реальному времени.

Использование стохастических уравнений (1) и (5) и уравнений электродинамики (2-4) и созданные соответствующие программы позволяют моделировать в дву- и трехмерном пространстве развитие разрядных плазменных каналов во времени, определять их траекторию и другие параметры в однородных и неоднородных диэлектриках [12]. Результаты моделирования можно применять для выбора геометрии электродов и конструирования электроразрядных устройств.

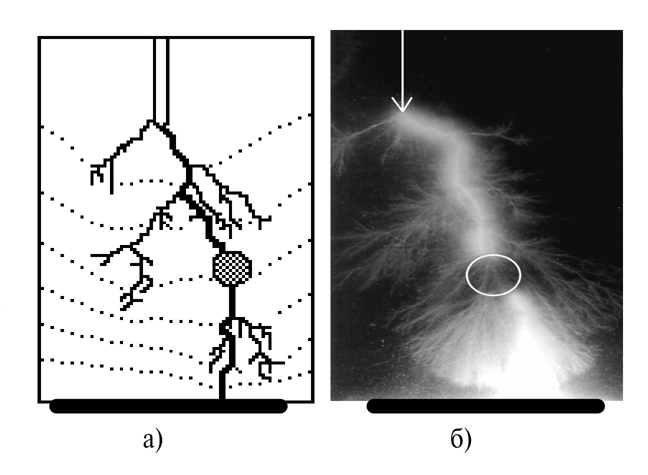


Рис. 1. *Траектория разряда в диэлектрике с проводящим включением: а) моделирование; б) эксперимент с глицерином, включение изображено окружностью*

В качестве примера приведены рассчитанные и зарегистрированные траектории каналов в диэлектрике с проводящими включениями, рис. 1. Подобные задачи решаются при дроблении горных пород для селективного извлечения включений.

Технологические применения разряда

Разрушающее действие ударных и акустических волн, генерируемых расширяющимся разрядным каналом в воде, используется в установках очистки внутренних поверхностей труб. Разрушение твердых минеральных отложений происходит за счет сдвиговых напряжений и напряжений растяжения, возникающих в них при взаимодействии волн с границами раздела жидкость-отложение-труба и способных их отслаивать. Конструкция электродной системы зависит от диаметра трубопроводов и природы отложений. Достоинством метода является возможность варьирования параметрами волн. Наши установки используются для очистки от накипи латунных трубок теплообменных аппаратов на ТЭЦ, где в обрабатываемые трубки вводится высоковольтный кабель с электродной системой на

конце и вода для удаления шлама. Производительность при этом достигает 5 м/с.

Подобная технология использована на Томской городской станции водоподготовки для очистки дренажных труб скорых фильтров, которые "зарастают" отложениями вплоть до закупорки, рис. 2. После обработки внутренней поверхности труб электрическими разрядами восстанавливалась скорость фильтрации, увеличивалась интенсивность промывки фильтров и снижались потери напора, таблица [13].

Полученные результаты не являются предельными, и отработка технологии продолжается. С помощью электроразрядной технологии восстанавливается работоспособность как теплообменных аппаратов [14], так и дренажных труб скорых фильтров без использования химических реагентов, что делает эту технологию экологически безопасной и перспективной. Механические способы очистки уступают в эффективности, а в непрямых трубопроводах они вообще неприменимы.

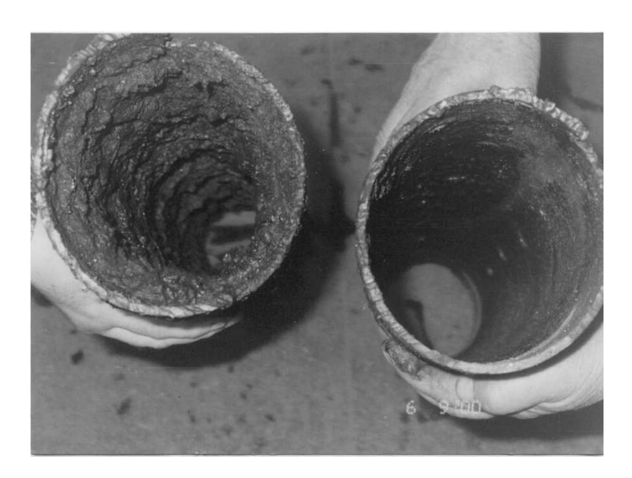


Рис 2. *Дренажная труба до и после электроразрядной обработки*

В электроразрядных технологиях, основанных на механическом разрушении твердых материалов, энергия импульса на уровне 10^3 Дж обеспечивается громоздкими генераторами, малопривлекательными для промышленного применения. Поэтому основные усилия направлены на снижение энергетических параметров импульса, вызывающего образование разрядного канала. Анализ результатов проведенных исследований показал возможность уменьшения энергии импульса до 30...50 Дж за счет повышения выделяемой в разрядном канале мощности и ее производной. Это достигается за счет временной компрессии энергии импульса.

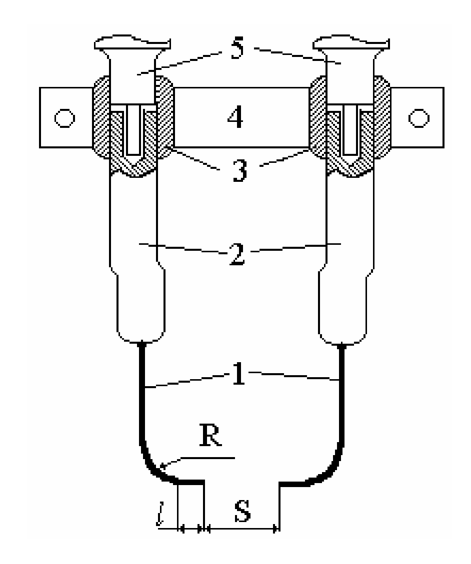
Режимы обработки были апробированы при резании гранита, габбро, песчаника и бетона в простой двухэлектродной системе в технической воде.

На рис. 3 представлена одна из электродных конструкций, с помощью которой проводились эксперименты.

Исследования доказали работоспособность таких электродных систем для установок резания, а также бурения скальных пород и снятия верхних слоев бетона. Появились реальные перспективы создания мобильных портативных устройств за счет снижения массогабаритных показателей основного элемента электроразрядных технологий - импульсного генератора. Решение этой задачи сделает электроразрядные технологии по эффективности конкурентоспособными с механическими технологиями.

Исследования электрического разряда как активатора химических реакций проводятся по нескольким направлениям. Наиболее продвинутыми на сегодняшний день являются работы по использованию электрического разряда в устройствах очистки и обеззараживания воды.

Общеизвестно, что электрический разряд в воздухе является генератором озона, одного из мощных окислителей, используемых в качестве альтер-



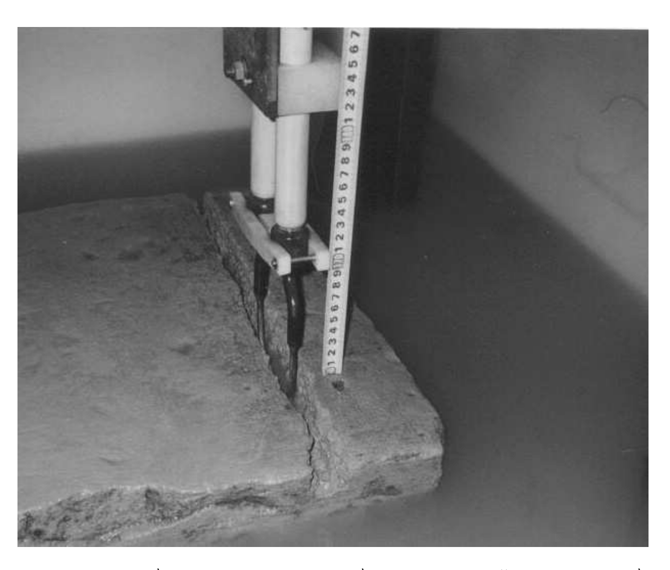


Рис. 3. *Электродная система: 1) электроды; 2) стальные держатели; 3) стальные патроны; 4) изоляционный держатель; 5) высоковольтные кабели*

Таблица. *Сравнительные характеристики скорых фильтров*

Материал дренажных труб	Время контроля	Скорость фильтрации, V, м/час		Интенсивность промывки, W, л/с·м²	Потери напора, м	
		максим.	рабочая		начальные	конечные
сталь	до очистки	6,87	6,87	5,6	2,3	2,5
	после обработки	24,19	10,0	21,0	0,1	0,85
полиэтилен	до очистки	6,79	6,79	5,4	1,63	2,04
	после обработки	15,12	8,28	12,0	0,4	0,8

нативы хлору. В существующих классических озонаторах для генерации озона используются подсушенный воздух. Однако исследования последних лет показали, что эффективность процессов окисления при использовании увлажненного воздуха выше. Сделаны предположения и частично подтверждены экспериментами, что при этом образуется не только озон, но и другие активные частицы, например, атомарный кислород и гидроксильные радикалы, которые по своей окислительной способности превосходят даже озон. На основании этого были разработаны озонаторы, составляющие основу водоочистного комплекса "Импульс" и установки "Стример", предназначенных для очистки воды из подземных и поверхностных источников до нормативного качества, для очистки и обеззараживания воды плавательных бассейнов, для доочистки и обеззараживания стоков.

Отличительной особенностью озонатора, используемого в комплексе "Импульс", является то, что он выполнен на основе импульсного барьерного разряда и способен работать в воздухе с влажностью 100 %. Это отличие позволило разместить озонатор непосредственно в водовоздушном потоке и использовать для обработки воды не только озон, атомарный кислород и гидроксильные радикалы,

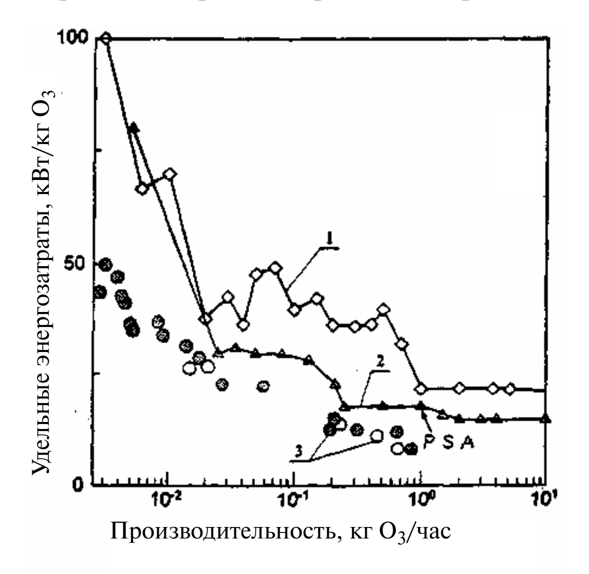


Рис. 4. *Сравнительные характеристики озонаторов: 1) озонатор, работающий в воздухе; 2) озонатор системы PSA, работающий в кислороде; 3) озонатор НИИ ВН, работающий в водовоздушной смеси; ● - данные фирмы Shinko Pantec; ○ - данные НИИ ВН*

но и УФ-излучение [15]. На рис. 4 приведены данные по эффективности генерации озона в сравнении с лучшими конструкциями озонаторов, представленными фирмой Shinko Pantec (Япония) [16].

Таким образом реализация технологического процесса совмещения воздействия УФ-излучения и окислителей позволила снизить затраты на обработку воды до 30...50 Вт·ч/м³. Концентрация озона в электроразрядном блоке обработки воды достигает 1,5...2 г/м³. Параметром регулирования производительности установок является частота следования импульсов.

Основными узлами комплекса "Импульс" являются: колонна в комплекте с озонатором и источником питания, бак-реактор, перекачивающие насосы и насос для промывки фильтров, фильтры, блок автоматики с необходимыми датчиками и приборами, трубопроводы, арматура, соединительные и коммутационные элементы. Для установок малой производительности изготавливаются и устанавливаются резервуары чистой воды. В качестве аэратора используется противопоточная вертикальная градирня. Входная вода распыляется эжектором и по загрузке аэратора стекает сверху вниз. Эжектор одновременно является ступенью аэрации. Воздух вентилятором подается навстречу потоку воды снизу вверх. Для улучшения перемешивания воды и воздуха аэратор заполнен полиэтиленовой стружкой. Электроразрядный блок представляет собой озонатор, в котором так же, как и в известных промышленных, используется барьерный разряд.

Основу технологической схемы установки "Стример" составляют озонатор, генератор наносекундных импульсов, система смешения воды с воздухом, содержащим повышенную концентрацию озона, бак-смеситель, засыпной фильтр, бак-накопитель чистой воды и блок управления и контроля.

Отличительной особенностью этой установки являются:

- конструкция озонатора, работающего на принципе объемного разряда, либо разряда, ограниченного емкостью диэлектрика;
- отсутствие предварительной подсушки воздуха и исключение из технологической схемы компрессора, ресивера, блока осушителей и системы их управления;
- параметры импульса, создаваемого специально разработанными генераторами питания.

При производительности до 3 м^3/час используется озонатор с объемным разрядом, при производительности более 3 м^3/час применяется многоискровой озонатор с емкостным ограничителем тока [17, 18]. Питание озонаторов осуществляется разработанными в НИИ генераторами мощностью от 50 до 250 Вт при частоте следования импульсов до единиц кГц. Система смешения и озонирования воздуха представляет собой эжекторный насос с водой в качестве рабочей среды. Коэффициент инжекции воздуха (объем воздуха, увлекаемый единичным объемом воды) достигает 2...2,5. При этом размер озоновоздушных пузырьков в воде составляет доли миллиметра, благодаря чему достигается высокая степень растворения атомарного кислорода и озона в воде [19].

Эксплуатационные преимущества разработанных устройств заключаются в предельно низких затратах энергии на обработку воды ~50 Вт/м^3, исключении предварительной сушки воздуха и образования азотсодержащих соединений (нитритов, нитратов) за счет импульсно-периодического режима ввода энергии в реактор и наносекундной длительности импульсов, наработке в увлажненном воздухе активных гидроксильных радикалов.

Предполагается, что высокое качество очистки достигается за счет синергетического эффекта (в комплексе "Импульс" дополнительно к окислителям на воду воздействуют дегидратированные электроны, сильное электрическое поле и ультрафиолет) [20]. Обработанная вода хорошо осветляется механическими фильтрами с зернистой загрузкой, в качестве которых используются недорогие минеральные породы (песок, альбитофир, горелая порода и др.).

Конструкция плазмохимического окислительного реактора и технология (озонная или электроразрядная) выбираются исходя из состава очищенной воды, из разработанных к настоящему времени и усовершенствованных в институте установок.

Водоочистные устройства успешно эксплуатируются на многочисленных объектах Западной Сибири и в других регионах страны. Высокий научно-технический уровень комплексов прошедших сертификацию, отмечен медалями престижных международных выставок (Брюссель, Париж, Москва и др.).

Таким образом, приведенные далеко не все разрабатываемые направления практического использования электрического разряда показывают перспективность технологий на его основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Завадовская Е.К., Каляцкий И.И., Кривко В.В., Панин В.Ф., Семкин Б.В., Торбин Н.М., Ушаков В.Я., Чепиков А.Т. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. - Томск: ТГУ, 1971. - 225 с.
2. Воробьев А.А. Ионные и электронные свойства щелочногалоидных кристаллов. - Томск: ТГУ, 1968. - 306 с.
3. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. - М.: Высшая школа, 1966. - 224 с.
4. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. - Томск: Изд-во ТГУ, 1975. - 255 с.
5. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. - М. Энергоатомиздат, 1988. - 152 с.
6. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 496 с.
7. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. - СПб.: Наука, 1995. - 276 с.
8. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. - СПб.: Наука, 2000. - 161 с.
9. Noskov M.D., Kukhta V.R., Lopatin V.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. - 1995. - V. 28. - P. 1187-1194.
10. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. // ЖТФ. - 1995. - Т. 65. - Вып. 2. - С. 63-75.
11. Lopatin V.V., Noskov M.D., Badent R., Kist R., Schwab A.J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1998. - V. 5. - № 2. - P. 250-255.
12. Курец В.И., Лопатин В.В., Носков М.Д. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2000. - № 3. - С. 81-87.
13. Муратов В.М., Яворовский Н.А., Андрейченко А.А., Гончаров О.Ю., Черкашин В.И. // Сборник материалов конгресса "ЭКВАТЕК-2002". - М., 2002. - С. 376-377.
14. Жучков А.И. // Техника и технология очистки и контроля качества воды: Труды международной научно-техн. конф. - Томск: ТПУ, 1999. - С. 144-150.
15. Yavorovsky N.A., Peltsman S.S., Khaskelberg M.B., Kornev J.I. // Proceeding Intern. Confer. PPA-2001, 27-29.03, Germany. P. E.12/1-E.12/8.
16. Яворовский Н.А., Поляков Н.П., Пельцман С.С., Цхе А.А. // Техника и технология очистки и контроля качества воды: Труды международной научно-техн. конф. - Томск: ТПУ, 1999. - С. 168-176.
17. Патент 2178774 РФ. Устройство для обработки воды // О.Б. Ковальчук, Б.Г. Шубин. 20.01.2002.
18. Патент 2179150 РФ. Устройство для получения озона // О.Б. Ковальчук, Б.Б. Кудабаев, Б.Г. Шубин. 20.02.2002.
19. Шубин Б.Г., Ковальчук О.Б., Кудабаев Б.Б., Сериков Л.В., Шиян Л.Н., Тропина Е.А. // Экология и промышленность России. - 2001. - № 2. - С. 17-20.
20. Яворовский Н.А., Соколов В.Д., Сколубович Ю.Л., Ли И.С. // Водоснабжение и санитарная техника. - 2000. - № 1. - С. 12-14.